

# 岩爆诱发因素的分析与评估在矿床开采过程中的作用

杨峰

昆明和安矿业有限公司，云南省大理市，650000；

**摘要：**本文旨在探讨岩爆诱发因素的分析与评估在矿床开采过程中的重要性。首先，文章将介绍岩爆的基本概念及其分类，然后深入分析影响岩爆的关键地质因素。在此基础上，文章将重点讨论矿床开采中岩爆风险的识别与预测方法，建立岩爆概率模型，并对岩爆影响进行量化评估。通过这些分析与评估，可以为矿床开采提供科学的决策支持，有效预防和控制岩爆灾害，保障矿工安全和矿产资源的高效利用。

**关键词：**岩爆诱发因素；评估；矿床开采；作用

DOI:10.69979/3041-0673.24.5.025

## 引言

矿产资源的开发对于支撑全球的经济发展具有举足轻重的作用，然而，矿床开采过程中常伴随着各种地质灾害，其中岩爆作为一种极具破坏性的现象，对开采效率和作业人员的安全构成严重威胁。本章旨在阐述研究岩爆诱发因素的分析与评估在矿床开采过程中的重要性，以及这项研究的现实背景和理论意义。

## 1 岩爆的定义与分类

岩爆，这一术语最早由瑞典地质学家 Gustaf Arrhenius 在 1886 年提出，用来描述在地下开挖过程中，由于岩石内部应力的突然释放，导致的突发性岩石破裂和弹射现象。岩爆的发生通常伴随着强烈的声响、振动，以及岩石碎片的高速飞射，对 miner 和设备构成威胁，更甚者可能引发巷道结构的破坏，导致矿难。

岩爆的分类主要依据其表现形式和诱发机制。一种常见的分类方法是根据岩爆的能量释放程度和破坏程度，将其分为轻微岩爆、中等岩爆和重大岩爆。轻微岩爆通常表现为岩石微裂或小规模弹射，破坏较小；中等岩爆则可能造成巷道局部破坏，影响通风和运输；而重大岩爆则会导致大规模的岩石崩塌，对开采活动构成严重威胁。

另一种分类方式是根据岩爆的诱发机制，可以将其分为应力型岩爆和结构型岩爆。应力型岩爆主要由地应力的突然释放引起，例如在深部开采时，开采活动改变了岩石的应力状态，当应力超过岩石的强度极限时，即可能发生岩爆。结构型岩爆则与岩体的结构特性有关，如断层、节理发育的岩体，由于其内部结构的不连续性，更容易在应力集中处发生破裂。

根据岩爆发生的时机，还可以分为施工岩爆和滞后岩爆。施工岩爆发生在开挖过程或立即之后，应力释放迅速，而滞后岩爆则在开挖后的一段时间内发生，可能是岩石应力重新

分布或二次应力积累的结果。理解这些分类有助于更精确地描述岩爆的特征，为风险评估和防控提供依据。

岩爆的定义和分类是研究其诱发因素的基础，通过深入理解岩爆的不同类型，可以针对性地研究其发生机理，为设计有效的预防和控制策略提供科学依据。在后续章节中，我们将详细探讨各类岩爆的诱发因素，以及如何通过综合评估模型来预测和管理岩爆风险。

## 2 影响岩爆的关键地质因素

在岩爆的诱发因素中，地质条件扮演着至关重要的角色。这些条件主要包括开采深度、岩层厚度与结构、地应力状态以及地表变形等，它们共同影响岩石的稳定性，进而决定岩爆发生的可能性和破坏程度。

开采深度是诱发岩爆的关键因素之一。随着地下开采的深度增加，岩石承受的自重压力增大，导致地应力水平随之提高。当这些地应力超过岩石的强度极限时，尤其是在硬岩矿床中，岩石可能在瞬间发生破裂，触发岩爆。因此，深部开采的矿床往往更易发生岩爆事件。

岩层厚度和结构对岩爆的影响也不容忽视。厚层坚硬的岩石，由于其内部应力容易集中，导致岩爆风险增加。相反，薄层或层理发育的岩石，因其应力扩散能力强，岩爆的可能性相对较低。此外，岩层中存在的结构不连续性，如断层和节理，会形成应力集中区，增加岩爆的可能性。

地应力状态，特别是应力的大小、方向和分布，对岩爆的发生具有决定性影响。水平应力、垂直应力的比例以及应力主轴的方向，都会影响岩石的破裂模式。例如，当水平应力大于岩石的抗剪强度时，更容易引发岩爆。同时，地应力的频繁变动，如地震活动，也可能触发岩爆。

地表变形则可以通过监测来预测岩爆。开采活动导致的地面沉降或塌陷，往往是地层内部应力调整的前兆，可能指示岩爆即将发生。通过地质雷达、地面位移监测等技术，可以实时监测地表变形，为岩爆预警提供依据。

理解这些地质因素对岩爆的影响，有助于矿产开采企业采取相应的预防措施，如调整开采深度、选择适当的开采方法、优化采矿布局等。通过地质勘查和监测技术，可以更准确地评估岩爆风险，以便提前采取预防性措施，减少岩爆对矿山开采效率和安全的影响。

在岩爆的防控策略中，地质因素的深入理解是不可或缺的。针对不同地质条件，开发适应性强的预防和控制技术，如地表预应力释放、巷道支护优化等，对于降低岩爆风险，保障矿产资源开发的可持续性至关重要。未来的研究应进一步深化对地质因素与岩爆关系的研究，以便开发出更为精准的预测模型和防控技术。

### 3 矿床开采中的岩爆风险评估

#### 3.1 岩爆风险的识别与预测

在矿床开采中，岩爆风险的识别与预测是实现安全开采的关键环节。这一过程结合了岩爆诱发因素的理论分析，通过对地质条件、岩石力学性质和开采方法的深入理解，以识别可能诱发岩爆的先兆，进而建立风险评估模型，预测岩爆发生的可能性和潜在危害程度。本文将详细介绍这些步骤，以便为实际开采提供科学依据和决策支持。

岩爆风险的识别涉及对地质条件的详细调查。这包括评估开采深度、岩层厚度、岩石类型、地应力状态以及地表变形等多个因素。例如，深部开采由于地应力的显著增加，岩爆风险相应提高；而存在大量断层和节理的岩体因应力集中，岩爆的可能性也相应增大。因此，通过地质雷达、地应力测试、地表位移监测等手段，收集这些关键参数，可以为后续的岩爆风险评估提供基础数据。

对岩石力学性质的深入了解也是风险识别的重要组成部分。岩石的强度、脆性、变形能力和内部结构特征，都会影响岩爆的易发程度。通过实验室测试和现场取样分析，可以获取岩石的力学参数，如抗压强度、抗剪强度和弹性模量等，这些数据对预测岩爆倾向性至关重要。同时，强度脆性系数、岩石的应力-应变曲线等指标，可以帮助识别不同岩石类型的岩爆敏感性。

在风险识别的基础上，构建岩爆风险预测模型是至关重要的步骤。模型的构建需要综合考虑地质条件、岩石力学参数和开采方法。一种常见的方法是基于统计分析和数值模拟，通过分析大量岩爆案例，找出岩爆发生的共性规律，如  $\sigma_0 \max / \sigma_c$  值、Wet 指数和  $\sigma_1 / \sigma_c$  值等，这些指标可以量化岩爆发生的可能性和严重程度。此外，模型也可能包括动态参数，如开采速度、爆破参数等，模拟开采过程中的应力变化，预测岩爆的潜在影响。

实际案例分析是验证风险评估模型的有效性和实用性的

关键。通过对实际开采过程中的岩爆事件进行回顾性分析，可以调整和优化模型，使其更适应特定矿床的条件。例如，内蒙古巴彦高勒煤矿的岩爆防控实践，通过基础性探测与测定工作，如地应力测试、地质结构分析，以及针对性的岩爆防控措施，如区域应力调控和局部卸压解危，显著降低了岩爆发生的频率，验证了岩爆风险评估模型的准确性。

岩爆风险的识别与预测构成了风险评估的基础，对于制定合理的开采策略、优化生产布局、实施预防措施具有决定性作用。通过持续的研究和实践，不断改进风险评估模型，提高预测精度，将有助于进一步降低岩爆对矿床开采的威胁，保障资源开发的效率与安全。随着科技的进步，如大数据分析、人工智能和远程监测技术的引入，未来岩爆预测的准确性和实时性有望得到显著提升，为矿产资源的可持续开发提供更为坚实的安全保障。

#### 3.2 岩爆概率模型的建立

建立岩爆概率模型是矿床开采风险评估的核心环节，它综合了地质条件、岩石力学性质、开采方法及历史岩爆数据等多种因素，旨在预测未来岩爆发生的概率。这一模型的构建通常遵循以下几个步骤：

数据收集与预处理是模型建立的基础。这包括对开采区域的地质条件进行详尽的调查，如采深、岩层厚度、地应力分布、岩体结构等，以及对岩石力学性质进行实验室测试，获取抗压强度、抗剪强度、弹性模量等关键参数。同时，历史岩爆事件的数据也需整理，包括岩爆发生的地点、时间、规模以及可能的诱发因素，这些信息有助于识别岩爆的潜在模式。

理论框架的构建是模型的核心。基于岩爆诱发因素的理论基础，如应力理论、断裂力学理论，以及岩石动力学理论，将地质条件、岩石力学性质和开采参数转化为可以量化的指标。例如，应力判据（如  $\sigma_1 / \sigma_c$  和  $\sigma_0 \max / \sigma_c$  值）和能量判据（如 Wet 指数）可作为预测岩爆的重要参数。此外，还可以考虑开采方法对应力场的影响，如爆破参数和巷道布置方式。

模型构建的下一个阶段是选择合适的统计或数学方法进行变量的分析和关联性研究。这可能涉及线性回归、逻辑回归、随机森林、支持向量机等机器学习算法，或者更复杂的概率模型，如马尔可夫链、蒙特卡洛模拟等。这些方法将帮助识别和量化各因素对岩爆概率的影响程度，并通过大量的历史数据训练模型，使其能够预测未来岩爆发生的可能性。

模型验证与优化是确保其实用性和精度的关键环节。通过与实际的岩爆数据进行对比，评估模型的预测能力，如果模型预测结果与实际岩爆事件吻合度较高，表明模型具有较好的预测能力。反之，则需要调整模型参数，或者引入新的

影响因素，以提高预测的准确性。

模型的应用和维护，将岩爆概率模型嵌入到矿山开采的决策支持系统中，实时监测地质条件和开采参数的变化，动态调整岩爆风险预测，为矿山管理人员提供及时的风险预警。同时，随着新的岩爆事件数据的积累，模型需要定期更新和优化，以保持其预测的时效性和准确性。

通过以上步骤，岩爆概率模型能够为矿床开采提供科学的决策依据，助力于制定针对性的预防措施，降低岩爆风险，保障矿产资源开发的效率和安全。随着科技的进步，模型的可视化和交互性将得到提升，使得风险评估结果更直观易懂，为矿产开采的决策过程提供更为有力的支持。

### 3.3 岩爆影响的量化评估

岩爆影响的量化评估是矿床开采风险管理体系中的重要组成部分，它旨在量化岩爆对矿山运营的影响程度，包括直接经济损失、生产效率降低以及安全风险的提升。量化评估可以帮助矿企制定更精确的防灾策略，优化生产计划，并为保险和风险管理提供依据。评估通常涉及多个方面，如岩爆的破坏性、岩爆事件的频率、矿产损失以及对人员安全的威胁。

破坏性评估关注岩爆对巷道、设备以及开采结构的破坏程度。这包括估算岩爆发生时产生的冲击波能量、弹射物的飞行速度和距离，以及对巷道稳定性和支护结构的破坏。通过现场监测数据和历史案例分析，可以建立破坏性指标，如岩爆能量指标和巷道损伤程度指数，以量化岩爆的破坏性。

岩爆事件频率的评估旨在确定岩爆发生的可能次数，这直接关系到矿山的生产稳定性。通过分析历史岩爆事件的时间间隔和地质条件的变化，可以预测未来岩爆的可能发生次数，从而为生产计划和资源分配提供依据。频率评估可能涉及建立时间序列模型，如泊松过程模型，来描述岩爆的随机发生。

矿产损失的评估关注岩爆对矿石开采量的直接影响。规模较大的岩爆可能导致开采区域的暂时或永久封闭，减少可开采资源量。通过估算岩爆影响区域的矿石储量，结合开采成本和市场价格，可以计算岩爆导致的直接经济损失。此外，矿石损失还可能导致开采计划的调整，间接影响生产效率。

人员安全风险评估旨在量化岩爆对作业人员生命安全的威胁。这包括评估岩爆引发的伤亡概率，以及由此造成的矿

工心理压力和工作环境恶化。通过计算岩爆事件中人员伤亡的历史比例，结合安全设施的有效性，可以建立安全风险指数，以量化人员安全风险。

为了进行综合量化评估，这些独立的评估模块需要整合到一个综合风险评价体系中。例如，可以建立一个多准则决策分析模型，将破坏性、频率、矿产损失和人员安全风险等指标权重化，产生一个综合的岩爆影响指数。这个指数可以作为矿床开采决策的参考，帮助矿企确定优先防控的区域，优化开采策略，并制定相应的应急预案。

量化评估的准确性依赖于数据的完整性、模型的适用性和参数的精确度。随着监测技术的进步，如远程传感器和实时数据采集系统，岩爆影响评估的数据基础将更加坚实。同时，通过机器学习和人工智能算法，可以更准确地预测岩爆的影响，提升评估的精度和实时性。

岩爆影响的量化评估不仅为矿企提供风险预警，也为科研人员提供了改进防爆技术和策略的依据。通过持续的评估和模型优化，矿床开采可以更有效地应对岩爆带来的挑战，提高资源开采的效率，保障作业人员的安全，以及降低对环境的影响。

### 4 结语

在矿床开采过程中，岩爆的预防和控制是确保作业安全和提高生产效率的关键。通过建立和应用岩爆概率模型，矿企能够提前识别潜在的岩爆风险，从而采取相应的预防措施。这些措施可能包括调整开采计划、加强支护结构、优化巷道布局等，以减少岩爆事件的发生和降低其对矿山运营的影响。此外，模型的定期更新和优化对于适应不断变化的地质条件和开采环境至关重要。随着技术的发展，未来岩爆风险评估和管理将更加智能化和自动化，为矿产资源的可持续开发提供强有力的技术支持。

### 参考文献

- [1] 冯帆. 深部高应力硬岩板裂化破坏特性及应变型岩爆发生机制[J]. 《岩石力学与工程学报》, 2019 年第 7 期 1512-1512, 共 1 页
- [2] 蔡鑫. 扰动诱发高应力岩石动力响应及岩爆灾变机理[J]. 《中国有色金属学报》, 2024 年第 7 期 2463-2475, 共 13 页.